

Лучко Й. Розрахунок оптимальних параметрів термообробки пластин рухомими зонами нагріву / Лучко Й., Добрянський І., Іваник Є. // Вісник ТНТУ. — 2010. — Том 15. — № 4. — С.13-20. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 539.374:621.78

Й. Лучко<sup>1</sup>, докт. техн. наук; І. Добрянський<sup>2</sup>, канд.техн.наук;  
Є. Іваник<sup>2</sup>, канд.фіз.-мат.наук

<sup>1</sup> Дніпропетровський національний університет залізничного  
транспорту ім. академіка В. Лазаряна

<sup>2</sup> Львівський національний аграрний університет

## РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМООБРОБКИ ПЛАСТИН РУХОМИМИ ЗОНАМИ НАГРІВУ

**Резюме.** Побудовано чисельно-аналітичну схему розрахунку термонапруженого стану пластин при локальній низькотемпературній термообробці рухомими джерелами нагріву. Вважається, що джерела нагріву переміщуються зі сталою швидкістю. Оцінено ефективність термообробки, яка характеризується параметром, що є відношенням максимуму інтенсивності температурних напружень у точках на шві до відповідних значень у ділянках оптимального розміщення локальних зон нагрівання. Виявлено вплив тепловіддачі з поверхні пластини на рівень залишкових стискуючих напружень у зоні зварного шва.

**Ключові слова:** локальна низькотемпературна обробка, пластини, рухомі джерела нагріву, зварні конструкції, залишкові напруження, температурне поле, температурні напруження, чисельно-аналітичний алгоритм.

**J. Lutchko, I. Dobryanskyi, E. Ivanyk**

## CALCULATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE THERMOPROCESSING OF THE PLATE BY MOVABLE SOURCES OF HEATING

**The summary.** Numerical-analytical scheme of calculation of the termonstress state of plate's by local lowtemperature thermoprocessing by movable sources of heating ist construction. Its suppose that sources of heating moving with constant velocity. The estimate of effectives of the thermoprocessing, which determine by parameter, which is relation of maximum intensity of temperature stresses in point on the joint to corresponding value in area optimal placing zones of local heating is made. Show influence of heat exchange from surface of the plate on the level residual compressible stresses in zone of the welding joint.

**Key words:** local lowtemperature thermoprocessing, plates, load, movable sources of heating, welding construction, residual stresses, temperature field, temperature stresses, numerical-analytical algorithm.

**Вступ.** Неперервне збільшення обсягів зварювальних робіт у промисловості й будівництві нерозривно пов'язане з розробленням способів мінімізації залишкових напружень і деформацій та їх шкідливим впливом на якість і працездатність зварних конструкцій. Найбільш розповсюдженим способом зниження залишкових напружень є загальна термічна обробка зварних конструкцій – відпуск [1]. Залежно від розмірів і типу зварних з'єднань, концентрації в них залишкових напружень застосовують локальну термообробку нерухомими або рухомими джерелами тепла.

**Аналіз досліджень і публікацій із розв'язання проблеми розрахунку параметрів локальної термообробки пластин рухомими зонами нагріву.** Питанню застосування локальної термообробки нерухомими зонами нагріву присвячено багато робіт [2-4], однак недостатньо повно представлено результати систематизованого підбору оптимальних параметрів технології термообробки з використанням рухомих джерел і стоків тепла. Зокрема, вказано тільки схематично, що області розміщення рухомих джерел тепла мають бути симетричними відносно зварювального шва, а також додатково до нагріву доцільно здійснювати охолодження шва.

Аналіз відомих літературних джерел дає право зробити висновок, що низькотемпературний спосіб обробки з метою зняття залишкових напружень дуже ефективний, а в багатьох випадках (для великогабаритних конструкцій) не замінимий.

Тому в зв'язку з підвищенням вимог до міцності й витривалості зварних конструкцій, а також висуванням вимог до зменшення металоємності та енерговитрат, вирішення проблем технології низькотемпературної термообробки є актуальною задачею і на даний час.

**Постановка мети і задачі дослідження.** Поряд з локальною термообробкою нерухомими джерелами тепла [5] в інженерній практиці (машинобудування, будівельна індустрія) застосовують низькотемпературну термообробку рухомими зонами нагріву, яка є найперспективнішою для зварних конструкцій з подовженими швами. Тому визначимо оптимальні параметри та дослідимо ефективність термообробки зварних пластин рухомими нормально-круговими джерелами тепла. Схема нагріву даного типу описує термообробку тонких металевих листів (з повним вирівнюванням температури по товщині) полум'ям газового нагрівача з віссю, перпендикулярною до поверхні листа [6].

**Виклад матеріалу досліджень.** Вважаємо, що джерела нагріву переміщуються зі сталою швидкістю  $v$ . Також припускаємо, що вихідні поздовжні залишкові напруження  $\sigma_{xx}^{(0)}$  в зоні зварного шва, середня лінія якого співпадає з віссю  $Ox$ , є розтягуючими і набагато перевищують поперечні  $\sigma_{yy}^{(0)}$ .

Згідно з результатами роботи [7] розподіл поздовжніх залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(0)}$  описуємо залежністю

$$\sigma_{xx}^{(0)} = \gamma \sigma_s^{(0)} (1 - y^2 / b^2) e^{-y^2 / (2b^2)}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – параметр, який змінюється в межах  $0 \leq \gamma \leq 1$ ;  $b$  – півширина зони розтягуючих напружень;  $\sigma_s^{(0)}$  – межа текучості матеріалу при кімнатній ( $t_0 = 20^\circ C$ ) температурі.

З метою ефективнішого зниження рівня поздовжніх залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(0)}$  в області зварного шва, локальну термообробку здійснювали для випадку симетрично-розміщених рухомих областей нагріву відносно нього. Також були реалізовані умови, за яких у системі координат  $Oxyz$ , яка рухається разом із джерелами нагріву, процес нагріву є встановленим, а центри зон нагріву розміщено в точках з координатами  $(0, \pm d, h)$ , де  $d$  – відстань центрів областей нагріву від середньої лінії зварного шва (осі  $Ox$ ),  $h$  – півтовщина пластини.

Необхідні для побудови чисельно-аналітичного алгоритму залежності, які визначають розподіл температурного поля  $t$  і термопружних напружень  $\sigma_{ij}^{(t)}$ , взято з роботи [8], заміною в них  $x - vt$  на  $x$  та покладаючи при цьому  $\tau \rightarrow \infty$  (усталений режим)

$$t = t_0 + \theta_0 \left[ A_1 J_0^{(t)}(x, y; \chi_1) + A_2 \frac{z}{h} J_0^{(t)}(x, y; \chi_2) \right];$$

$$\sigma_{ij}^{(t)} = \frac{1}{2} E \alpha_t \theta_0 \left[ A_1 J_{ij}(x, y; \chi_1) + A_2 \frac{z}{h} J_{ij}(x, y; \chi_2) \right]. \quad (2)$$

В залежностях (2) позначено:

$$A_1 = A/2; A_2 = 3A/2; A = \chi_1 a / k_*; \chi_1 = Bi / h^2;$$

$$\chi_2 = 3(1 + Bi) / h^2; J_0^{(t)}(x, y; \chi_l) = \int_0^\infty \Phi_0(x, y; \chi_l, u) du;$$

$$\Phi_0(x, y; \chi_l, u) = E_1(\chi_l, u) [E_2^+(x, y; u) + E_2^-(x, y; u)] / B(u);$$

$$E_1(\chi_l, u) = e^{-\alpha \chi_l u}; E_2^\pm(x, y; u) = e^{-r_\pm^2 / B(u)}; B(u) = 4au + 1 / k_*; r_\pm^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}_\pm^2; \bar{x} = x + vu;$$

$$\bar{y}_\pm = y \pm d; J_{ij}(x, y; \chi_l) = \int_0^\infty \Phi_{ij}(x, y; \chi_l, u) du \quad (l = 1, 2);$$

$$\Phi_{ij}(x, y; \chi_l, u) = E_1(\chi_l, u) [\Phi_{ij}^+(x, y, u) + \Phi_{ij}^-(x, y, u)];$$

$$\Phi_{xx}^\pm(x, y, u) = -\frac{1}{r_\pm^4} \left\{ r_\pm^{-2} + \left[ 2 \frac{\bar{y}_\pm^2 r_\pm^2}{B(u)} - r_\pm^{-2} \right] E_2^\pm(x, y, u) \right\};$$

$$\Phi_{yy}^\pm(x, y, u) = -\frac{1}{r_\pm^4} \left\{ -r_\pm^{-2} + \left[ 2 \frac{\bar{x}^2 r_\pm^2}{B(u)} - r_\pm^{-2} \right] E_2^\pm(x, y, u) \right\};$$

$$\Phi_{xy}^\pm(x, y, u) = 2 \frac{\bar{x} \bar{y}_\pm}{r_\pm^4} \left\{ \left[ \frac{r_\pm^2}{B(u)} + 1 \right] E_2^\pm(x, y, u) - 1 \right\}; \quad \bar{r}_\pm^2 = \bar{x}^2 - \bar{y}_\pm^2, \text{ де}$$

$a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $Bi$  – критерій Біо;  $\theta_0$  – максимальне значення температури нормально-кругових джерел тепла;  $E$  – модуль Юнга;  $\alpha_l$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення;  $k_*$  – коефіцієнт зосередженості нагріву.

**Результати досліджень.** Оскільки пластична текучість, яка призводить до зниження рівня залишкових зварних напружень, виникає в тих точках, де сумарне значення зварних  $\sigma_{ij}^{(0)}$  і тимчасових термопружних напружень  $\sigma_{ij}^{(t)}$  буде сягати значення межі текучості  $\sigma_s$ , то відстань  $d$  необхідно вибирати, керуючись принципом: термопружні напруження в зоні зварного шва мають бути розтягуючими і якомога більшими. Виходячи з цього, а також беручи до уваги умови текучості Мізеса [9-11], доходимо висновку, що відстань  $d$  слід визначати з умови, що в точках на зварному шві має досягатися максимум різниці напружень  $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$  при  $y = 0$ .

Результати чисельних розрахунків у серединному січенні пластини  $z = 0$  оптимальних відстаней  $d_{op}$  при різних значеннях параметрів  $Bi$ ,  $\nu$ ,  $a$  і розмірів зони нагріву, яка характеризується радіусом  $r_*$ , наведено в табл. 1.

В табл. 1 подано наближену оцінку ефективності термообробки, яка характеризується параметром  $\varepsilon$ : цей параметр є відношенням максимуму інтенсивності температурних напружень на шві (тобто при  $y = 0$ ) до максимуму інтенсивності температурних напружень у точках, що відповідають значенню оптимальних відстаней  $d_{op}$  (тобто при  $y = \pm d_{op}$ ). З наведених даних випливає, що більшому значенню максимуму інтенсивності термопружних напружень на шві, тобто величині  $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$  при  $y = 0$ , відповідатиме ефективніша локальна термообробка. Наведені в табл. 1 дані також показують, що ефективність локальної термообробки суттєво залежить від значень параметрів  $Bi$ ,  $\nu$ ,  $a$ , радіуса плями нагріву  $r_*$ : збільшення тепловіддачі та радіуса  $r_*$ , але зменшення швидкості переміщення джерел нагріву призводить до підвищення ефективності термообробки. Крім того, ефективність локальної термообробки залежить від виду самого матеріалу, що зумовлюється, в основному, коефіцієнтом температуропровідності  $a$ . Для пластини з титанового сплаву BT5 ефективність термообробки нижча, ніж для пластини зі сталі 09Г2С, тоді як для пластини з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 вона вища.

Таблиця 1. Оптимальні відстані розміщення зварних джерел тепла

Параметри	$d$ , м	$\varepsilon$
-----------	---------	---------------

09Г2С: $a = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ; $\nu = 0,004 \text{ м/с}$ ; $r_* = 0,02 \text{ м}$		
$Bi=0,01$	0,055	0,433
$Bi=0,1$	0,040	0,672
$Bi=1,0$	0,030	1,087
09Г2С: $a = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ; $\nu = 0,004 \text{ м/с}$ ; $Bi = 0,1$		
$r_* = 0,030 \text{ м}$	0,060	0,759
$r_* = 0,020 \text{ м}$	0,040	0,672
$r_* = 0,015 \text{ м}$	0,035	0,598
09Г2С: $a = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ; $Bi = 0,1$ ; $r_* = 0,02 \text{ м}$		
$\nu=0,002 \text{ м/с}$	0,045	0,809
$\nu=0,004 \text{ м/с}$	0,040	0,672
$\nu=0,008 \text{ м/с}$	0,035	0,542
$Bi = 0,1$ $r_* = 0,02 \text{ м}$ ; $\nu = 0,004 \text{ м/с}$		
09Г2С $a=0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	0,040	0,672
АМГ6 $a=0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	0,040	0,959
ВТ5 $a=0,034 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	0,040	0,474

Наведемо кількісну оцінку ефективності локальної термообробки зварних пластин зі сталі 09Г2С, для яких початкові поздовжні залишкові напруження  $\sigma_{xx}^{(0)}$  задано у вигляді (1). При цьому використаємо чисельно-аналітичний алгоритм побудови розв'язку задачі термопластичності [12,13], причому виберемо за параметр навантаження замість часу  $\tau$  максимальну температуру зовнішнього середовища  $\theta_0$ . Внаслідок симетрії задачі стосовно нагріву відносно серединної лінії зварного шва при розрахунках достатньо обмежитись областю  $y \geq 0$ . Процес відслідковування розвитку пружно-пластичних деформацій за навантаженням  $\theta_0$  здійснювався зі сталим кроком  $\Delta \theta_0 = \Delta p \theta_0^{(\max)}$ , де  $\Delta p$  – сталий крок параметра навантаження  $p$ ;  $\theta_0^{(\max)}$  – максимальне значення температури  $\theta_0$ .

Результати розрахунків поведінки поздовжніх залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(r)} / \sigma_s^{(0)}$  в серединній площині  $z=0$  залежно від параметра  $\theta_0$  і координати  $y$  при  $\gamma=0,9$ ;  $b=0,2 \text{ м}$ ;  $\nu=0,004 \text{ м/с}$ ;  $\sigma_s^{(0)}=300 \text{ МПа}$ ;  $r_*=0,02 \text{ м}$ ;  $d=d_{op}$  (значення  $d_{op}$  визначено з урахуванням даних табл. 1) представлено у вигляді графіків на рис. 1 і 2. Точкам на цих рисунках відповідає максимум значення параметра  $\theta_0$ , при якому пластичні деформації виникають в областях нагріву (тобто при  $y=\pm d_{op}$ ). На рис. 1 і 2 суцільні лінії – результати розрахунків в січенні  $y=0,002 \text{ м}$ , штрихові –  $y=0,001 \text{ м}$ . На рис. 2 криві 1 відповідають термообробці без додаткового охолодження шва, криві 2 – термообробці з додатковим охолодженням зварного шва стоками тепла (в 4 рази меншої інтенсивності в порівнянні з джерелами нагріву), розподіленими в круговій області радіуса  $0,02 \text{ м}$  і з центром у точці з координатами  $(-0,05 \text{ м}; 0 \text{ м})$ . На рис.3 крива, позначена 0, відповідає розподілу залишкових напружень перед термообробкою ( $\theta_0=0$ ).

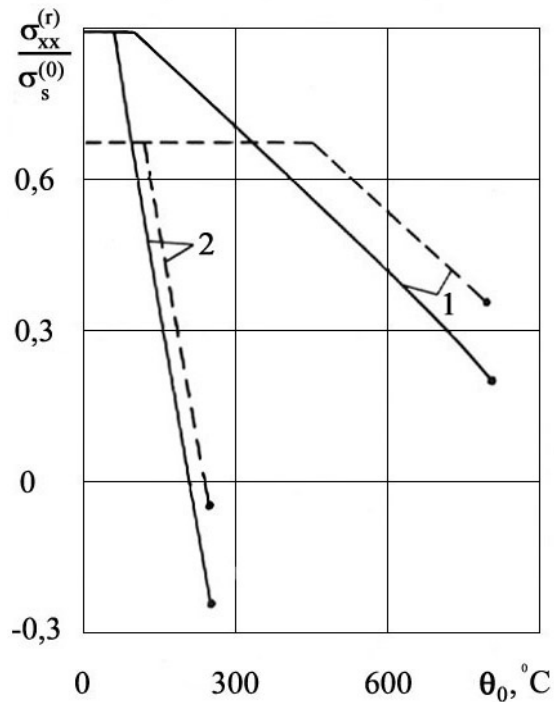


Рисунок 1. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(r)}$  у зварній пластині після термообробки рухомими зонами нагріву при  $Bi = 0,1$  (криві 1) і  $Bi = 1$  (криві 2)

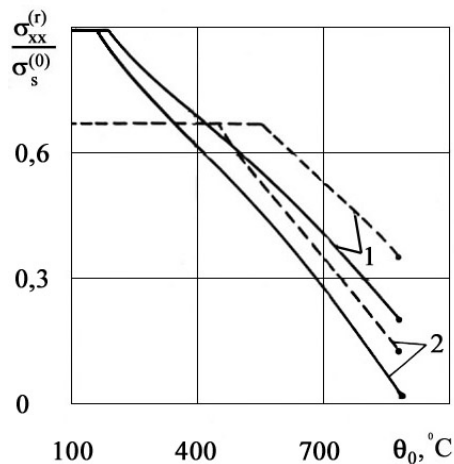


Рисунок 2. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(r)}$  у зварній пластині після термообробки рухомими зонами нагріву при  $Bi = 0,1$

Як показують результати розрахунків максимально допустима температура  $t_d^{(\max)}$ , за якої виникають залишкові напруження розтягу в зонах дії джерел нагріву, складає  $170...195^\circ\text{C}$ . Проведені дослідження показали також, що застосування сумісно з нагрівом додаткового охолодження зварного шва дозволяє знизити залишкові розтягуючі напруження до нуля, наприклад, при значенні  $Bi = 0,1$ .

Визначимо (з урахуванням тепловіддачі), при вказаних вище значеннях вхідних параметрів, оптимальний кут нахилу  $\varphi_{opt}$  зон розподілу джерел тепла до додатного напрямку осі  $Ox$ . Для цього необхідно виконати відповідні розрахунки поздовжніх залишкових напружень, що виникають при термообробці нормально-круговими

джерелами тепла, схему розміщення яких вказано на рис. 3. Результати числового розрахунку поздовжніх залишкових напружень зображено на рис. 4.

Представлені графіки на цьому рисунку показують, що кут нахилу ( $\varphi = \pm \pi/3$ ) прямої, який з'єднує центри зон нагріву, до додатного напрямку осі  $Ox$  (напрямку руху джерел) є оптимальним.

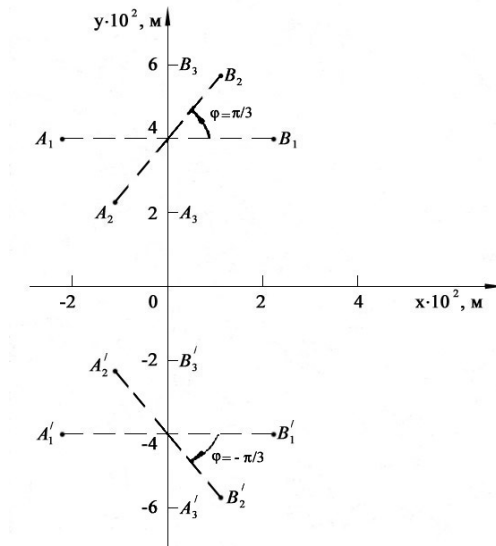


Рисунок 3. Схема розміщення центрів рухомих нормально-кругових джерел відносно середньої лінії зварювального шва пластини

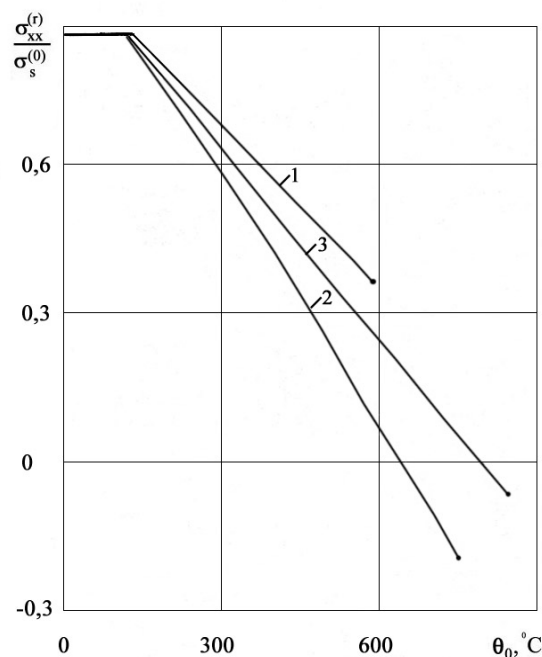


Рисунок 4. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(r)}$  у зварній пластині після термообробки нормально-круговими джерелами тепла:

крива 1 – центри джерел нагріву розміщено в точках  $A_1, B_1, A'_1, B'_1$ ; 2 – в точках  $A_2, B_2, A'_2, B'_2$ ; 3 – в точках  $A_3, B_3, A'_3, B'_3$

**Висновки.** Чисельно оцінено точності методики розв'язування задачі термопружності стосовно локальної низькотемпературної термообробки пластин.

Визначено оптимальні параметри і досліджено ефективність вказаного способу зварювання. В результаті встановлено: збільшення тепловіддачі (тобто збільшення критерію Біо  $Bi$ , що досягається охолодженням рівномірно нагрітої пластини) дає можливість не лише зняти, але й навести на зварному шві значні за величиною і ділянкою, де вони зосереджуються, напруження стиску, які, згідно з результатами роботи [14], суттєво підвищують надійність і термін служби елементів зварних конструкцій. При одних і тих же параметрах термообробки залишкові напруження при зварюванні можна значно знизити, тобто зменшити їх рівень до величини значно нижчої, ніж вона була до початку процесу термообробки.

#### Література

1. Винокуров В. М. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений / В. М. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.
2. Беседина Л.П. Об оптимальной низкотемпературной обработке зоны меридионального сварного шва цилиндрической оболочки / Л. П. Беседина, Н. И. Полищук // Мат. методы и физ.-мех. поля. – 1978. – Вып. 8. – С.71–74.
3. Климочкин М. М. Местная термическая обработка сварных швов патрубков сосудов / М. М. Климочкин // Сварочное производство. – 1978, № 10. – С.41–42.
4. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В. И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 320 с.
5. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машиностроение, 1951. – 296 с.
6. Сварка в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.1. – 504 с.
7. Masubuchi K. Investigation of residual stresses by use hydrogen cracking / K. Masubuchi, D. C. Martin //Welding Journal. – 1961. – V.40, № 12. – P.553–563.
8. Максимович В. Н. Термопластическое состояние пластин при локальном нестационарном нагреве / В. Н. Максимович, А. А. Чабаненко //Инж.-физ. журн. – 1985. – Т.48, № 2. – С.340–341.
9. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Издательство АН СССР, 1963. – 271 с.
10. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В. И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 320 с.
11. Шевченко Ю.Н. Пространственные задачи термопластичности / Ю. Н. Шевченко, М. Е. Бабешко, В. В. Пискун, В. Г. Савченко. – Киев: Наукова думка, 1980. – 264 с.
12. Максимович В.Н. Численно-аналитическое решение задачи термопластичности для локально нагреваемых пологих оболочек / В. Н. Максимович, Л. В. Хомляк // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1988, № 5. – С.126–132.
13. Добрянський І.М. Метод визначення пружно-пластичного напруженого стану елементів зварних конструкцій за умов локально-концентрованих навантажень / І. М. Добрянський, Л. В. Хомляк, Є. Г. Іваник, Л. О. Добрянська // Вісник Львівського державного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2006, № 7. – С.188–195.
14. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений / В. И. Труфяков. – Киев: Наукова думка, 1973. – 216с.

Отримано 28.06.2010